

Annexe A

Réactions nucléaires

Les travaux de Röntgen, Rutherford, Marie Curie, etc. (fin XIXe – début XXe siècles) ont montré qu'un grand nombre de noyaux sont instables, et se désintègrent naturellement pour former des espèces plus stables. On a pu observer que les noyaux "stables" de numéro atomique $Z < 20$ ont autant de protons que de neutrons, alors que les noyaux stables plus lourds contiennent plus de neutrons que de protons.

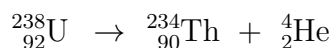
Note : les éléments radioactifs trouvés dans la nature sont appelés radionucléides, et les éléments obtenus artificiellement sont appelés radioéléments.

A.1 Radioactivité

A.1.1 Types de radioactivité

Il existe plusieurs types de radioactivité, dont les caractéristiques sont récapitulées dans le Tableau A.1. Ces réactions sont spontanées, il s'agit de radioactivité naturelle (même si le noyau instable père a été créé artificiellement). Chaque désintégration correspond à une transition énergétique du noyau : comme les électrons d'un atome, les nucléons d'un noyau sont répartis sur des niveaux d'énergie. Les différents types de radioactivité font intervenir différents types d'interactions.

La radioactivité α fait intervenir l'interaction nucléaire (ou interaction forte), et consiste en l'émission d'un noyau d'hélium. Les énergies cinétiques de noyaux d'hélium émis correspondent aux transitions énergétiques permises, elles suivent donc un spectre de raies (cf. Fig. A.1). Par exemple :



La radioactivité β fait intervenir l'interaction faible, et consiste en l'émission d'un électron (ou positron) et d'un (anti-)neutrino électronique, après transformation d'un proton du noyau en neutron (ou inversement). L'énergie de la transition correspondante est répartie entre le neutrino et l'électron, on observe donc des spectres continus des énergies cinétiques des électrons (cf. Fig. A.1). Par exemple :



Le carbone 14, créé par interaction du rayonnement cosmique avec l'azote de l'atmosphère, est présent en quantité constante dans les organismes vivants. La quantité présente dans les objets inanimés décroît avec le temps ce qui permet une application à la datation d'objets anciens.

| Radioactivité | Particule(s) émise(s) | Équation |
|----------------------|---|--|
| α | noyau d'hélium He^{2+} | ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$ |
| β^- | électron e^- , antineutrino $\bar{\nu}_e$ | ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{Y} + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}_e$ |
| β^+ | positron e^+ , neutrino ν_e | ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_1e + {}^0_0\nu_e$ |
| γ | photon γ | ${}^A_Z\text{Y}^* \rightarrow {}^A_Z\text{Y} + \gamma$ |
| Capture électronique | neutrino ν_e , photon X | ${}^A_1\text{p} + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_0\text{n}$ |

TABLE A.1 – Différents types de radioactivité et leurs caractéristiques.

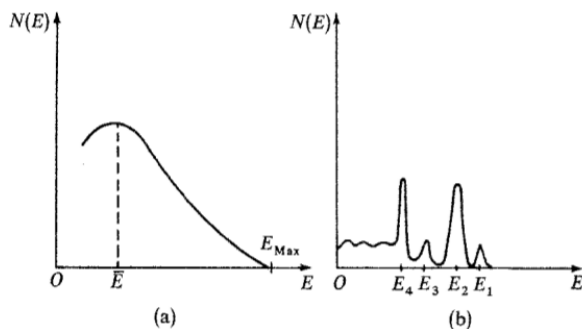


FIGURE III.4

Le nombre d'électrons, $N(E)$, ayant une énergie cinétique comprise entre E et $E + dE$, donne lieu à un spectre continu (a) s'achevant à l'énergie E_{Max} . Ceci contraste avec les spectres discrets α et γ (b).

FIGURE A.1 – Spectres des particules émises par désintégrations β (gauche) α (droite). (source : L. Valentin, *Le monde subatomique*, Ed. Hermann (1995))

La radioactivité γ fait intervenir l'interaction électromagnétique. Un noyau à l'état excité (par ex. le noyau-fils d'une désintégration β ou α produit à l'état excité) peut émettre un ou des photon lorsque un ou plusieurs de ses nucléons rejoignent des niveaux d'énergie plus bas. Le rayonnement émis appartient au domaine γ ($> 100 \text{ keV}$).

La capture électronique, plus rare que les autres types de radioactivité, fait intervenir les interactions faible puis électromagnétique et est similaire à la radioactivité β^+ . Un électron de la couche $1s$ ou K est capturé par un proton du noyau, qui devient un neutron en émettant un neutrino. Les électrons du cortège électronique se réarrangent en émettant un ou des photons du domaine X (domaine des transitions énergétiques vers la couche K des noyaux lourds).

A.1.2 Demi-vie et activité

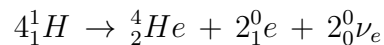
Chaque désintégration est caractérisée par une demi-vie $t_{1/2}$ ou période T , correspondant à la disparition de la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon. Par exemple, l'uranium 238 a une demi-vie d'environ 4,5 milliards d'années. Le carbone 14 a une demie-vie de 5700 ans, et permet donc la datation d'objets d'au moins 1000 ans et au plus 60 000 ans (en deçà et au-delà de ces limites la mesure est trop imprécise). Plus un élément est stable, plus sa demi-vie est longue.

L'activité radioactive A d'un échantillon de matériau est le nombre de désintégrations par seconde, comptées en provenance de l'échantillon. Elle est mesurée en Becquerel (Bq). On peut aussi mesurer l'activité radioactive dans un lieu donné (à partir d'un échantillon d'air ambiant). On mesure la concentration en éléments radioactifs en Becquerel (Bq) par m^3 d'air (c'est donc une activité par unité de volume). Le seuil de précaution est $400 \text{ Bq} \cdot m^{-3}$ et le seuil d'alerte $1000 \text{ Bq} \cdot m^{-3}$. La demi-vie correspond également à la durée nécessaire pour que l'activité d'un échantillon (de composition connue) soit divisée par 2.

A.2 Fusion et fission

Les réactions nucléaires faisant apparaître plusieurs “réactifs” peuvent être naturelles ou artificielles. Elles se répartissent en deux catégories.

Dans une réaction de fusion thermonucléaire, le noyau formé est plus massif que chaque réactif. Des réactions de ce type ont eu lieu juste après le Big Bang (nucléosynthèse primordiale), et ont lieu en permanence au cœur des étoiles (nucléosynthèse stellaire). Certains éléments lourds sont synthétisés au moment des supernovæ. La mise au point de la fusion contrôlée est à l'étude dans plusieurs réacteurs expérimentaux. Un exemple de réaction de nucléosynthèse stellaire :



Le bombardement de noyaux lourds par des particules énergétiques (neutrons, protons, deutons ${}_1^2d$) permet de créer des noyaux instables (plus légers que les noyaux pères. Les noyaux-fils se désintègrent par radioactivité, ils peuvent être utilisés par exemple comme marqueurs en imagerie médicale (scintigraphie, tomographie). L'iode 131, le césium 137, le xénon 133, le molybdène 99 sont issus de la fission de l'uranium.

A.2.1 Bilan énergétique

On remarque que les noyaux atomiques ont une masse inférieure à la somme des masses de leurs composants. Cette différence est appelée défaut de masse :

$$D_e = (Zm_p + (A - Z)m_n) - m\left({}_Z^AX\right)$$

Plus cette différence est importante, plus un noyau est stable. L'énergie Q à fournir pour séparer les constituants d'un noyau est proportionnelle à ce défaut de masse :

$$Q = E_0(\text{constituants}) - E_0(\text{noyau}) = (Zm_p + (A - Z)m_n)c^2 - m\left({}_Z^AX\right)c^2$$

$$\text{ssi } Q = D_e c^2$$

On note $E_\ell = -Q (< 0)$ l'énergie de liaison d'un noyau, interaction forte résiduelle expliquant la cohésion du noyau.

Pour une réaction quelconque, on peut écrire un bilan d'énergie sous la forme :

$$Q = c^2 (m(\text{produits}) - m(\text{reactifs}))$$

Si $Q > 0$ la réaction consomme de l'énergie, si $Q < 0$ elle en produit. Les réactions de fusion thermonucléaire et les réactions de fission nucléaire produisent de l'énergie.

A.3 Équilibrer des équations-bilans

Une méthode simple pour équilibrer ce type d'équations consiste à :

- équilibrer le nombre de nucléons ;
- équilibrer les charges électriques (au besoin en ajoutant des électrons ou positrons) ;
- équilibrer le nombre de leptons (ajouter un neutrino ou anti-neutrino pour chaque positron ou électron ajouté à l'étape précédente).

Au cours de ce processus, vous pourrez identifier le type de réaction (par ex. selon le nombre de réactifs, l'écart de A ou Z entre noyau père et noyau(x) fils, ...), ce qui vous permettra de compléter sûrement et rapidement l'équation. Voir TD2 pour quelques exemples.